



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตภาชนะบรรจุอาหารจากใบมันสำปะหลังโดยใช้การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนและวิธีพื้นผิวตอบสนอง

Optimal forming condition for producing the food container from cassava leaves using Box–Behnken design and response surface methodology

ชาตรี หอมเขียว^{1*} ชัยณรงค์ ศรีวัชรบุตร² วรพงศ์ บุญช่วยแทน¹

¹หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

²สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

Chatree Homkhiew^{1*} Chainarong Srivabut² Worapong Boonchouytan¹

¹Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla, 90000

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla, 90000

* Corresponding author.

E-mail: chatree.h@mutsv.ac.th; Telephone: 0 7431 7162

วันที่รับบทความ 27 มีนาคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 20 มิถุนายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ 8 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนและวิธีพื้นผิวตอบสนองได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบปัจจัยในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากใบมันสำปะหลังด้วยวิธีการอัดรีด ได้แก่ อุณหภูมิขึ้นรูป แรงดันการอัดขึ้นรูป และระยะเวลาการอัดขึ้นรูป ตลอดจนเพื่อหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตบนพื้นฐานสมบัติแรงอัดในแนวตั้ง แรงต้านการทิ่มทะลุ และระยะเวลาการดูดซึมน้ำ การขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากใบมันสำปะหลังตัวอย่างกระทำโดยใช้เครื่องอัดรีด จากการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิขึ้นรูปในช่วง 170-190 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ความสามารถต้านทานแรงอัดในแนวตั้งและแรงต้านการทิ่มทะลุของภาชนะบรรจุอาหารจากใบมันสำปะหลังลดลงอย่างช้า ๆ อย่างไรก็ตาม การอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันที่สูงขึ้นในช่วง 1500-2200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ส่งผลให้ความสามารถต้านทานแรงอัดในแนวตั้งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่มีผลให้แรงต้านการทิ่มทะลุลดลง และการเพิ่มระยะเวลาการอัดขึ้นรูปในช่วง 5-9 นาที ส่งผลให้ระยะเวลาการดูดซึมน้ำนานขึ้น ขณะที่การเพิ่มระยะเวลาการอัดขึ้นรูปในช่วง 5-6.5 นาที ทำให้แรงต้านการทิ่มทะลุลดลง นอกจากนี้ สมการถดถอยของแรงอัดในแนวตั้ง แรงต้านการทิ่มทะลุ และระยะเวลาการดูดซึมน้ำ สามารถหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดของภาชนะบรรจุอาหารจากใบมันสำปะหลังได้ดังนี้ การขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส แรงดันการอัดขึ้นรูป 1600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และระยะเวลาการอัดขึ้นรูป 6 นาที โดยมีค่าความพึงพอใจ 0.615 และค่าผลตอบสนองจากการทำนายแรงอัดในแนวตั้ง 22.5 นิวตัน แรงต้านการทิ่มทะลุ 1.41 นิวตัน และระยะเวลาการดูดซึมน้ำ 22.5 นาที เช่นเดียวกันพบว่า ภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดนี้ มีค่าการทดลองจริงแตกต่างสูงสุดจากค่าที่ได้จากการทำนายน้อยกว่า 5%

คำสำคัญ

การออกแบบการทดลอง มันสำปะหลัง ซีเลียมัยางพารา การอัดรีด สมบัติทางกล

Abstract

Box-Behnken design and response surface methodology were applied to analyze the effects of factors in hot compression of food container from cassava leaves, namely forming temperature, pressure, and time, as well as finding an optimal forming condition in production based on vertical compression force, puncture force, and water absorption time. The forming of food containers from cassava leaves was conducted using a hot-compression machine. From the experiment, an increase of the forming temperature in the range of 170-190 °C caused the vertical compression force and puncture resistance of the food containers decreased slowly. However, the forming with higher compression pressures in the range of 1500-2200 psi resulted in vertical compression force resistance was clearly increased, but reduced the puncture force resistance. Increasing the forming time in the range of 5-9 minutes affected in a longer water absorption time but the forming time in the range of 5-6.5 minutes resulted in a decrease of puncture force. In addition, the regression models fitted of the vertical compression force, puncture force, and water absorption time were used to optimize the forming condition for manufacturing the food container from cassava leaves. An optimal condition found was the forming temperature 170 °C, forming pressure 1600 psi, and forming time 6 minutes with a desirability score of 0.615, and the predicted responses were the vertical compression force 22.5 N, puncture force 1.41 N, and water absorption time 22.5 minutes. Likewise, the food container produced with this optimal condition had the actual experimental value that differs with predicted value by less than 5%.

Keywords

design of experiment, cassava, rubberwood sawdust, hot compression, mechanical property

1. บทนำ

มันสำปะหลังนับเป็นพืชเศรษฐกิจเชิงพาณิชย์ที่สำคัญของประเทศไทยตลอดระยะเวลากว่า 50 ปี ประเทศไทยมีพันธุ์ของมันสำปะหลังที่ปลูกทั่วไปอยู่ 2 กลุ่ม ได้แก่ พันธุ์ชนิดหวาน (Sweet type) เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic) ต่ำ ใช้หัวเพื่อการบริโภคได้โดยตรง รสไม่ขม มีทั้งชนิดเนื้อร่วนนุ่ม และชนิดเนื้อเหนียวแน่น และพันธุ์ชนิดขม (Bitter type) เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิก (HCN) สูงกว่าชนิดแรก และมีรสขมเนื้อหยาบไม่เหมาะสำหรับการบริโภคของมนุษย์หรือใช้หัวมันสดเลี้ยงสัตว์โดยตรง แต่เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่มีปริมาณแป้งสูงจึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปต่าง ๆ เช่น แป้งมัน มันเส้น มันอัดเม็ด และแอลกอฮอล์ ขณะเดียวกัน ในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีพื้นที่เก็บเกี่ยว 9,003,374 ไร่ ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ 3.145 ตัน และผลผลิตหัวมันสดทั้งปีอยู่ที่ 28,319,817 ตัน [1] อย่างไรก็ตาม ในการปลูกมันสำปะหลังมีใบมันสำปะหลังเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากทั้งในระหว่างการปลูกและหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต ซึ่งวัสดุเหลือใช้ี้มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตภาชนะบรรจุอาหาร

ประเทศไทยเกิดขยะจากการใช้ภาชนะบรรจุอาหารจำนวนมาก ส่วนใหญ่เป็นภาชนะบรรจุอาหารจากพลาสติก ซึ่งกลายเป็นปัญหาในการกำจัด เนื่องจากการย่อยสลายพลาสติกต้องใช้ระยะเวลาหลายร้อยปี [2] ดังนั้น นักวิจัยจำนวนมากพยายามพัฒนาภาชนะบรรจุอาหารจากวัสดุธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ 100% ในระยะเวลาอันสั้น ยกตัวอย่าง ปาฐาติ ธาธาพัตราพร และวงศ์ผกา วงศ์รัตน์ [3] พัฒนาบรรจุภัณฑ์จากผักตบชวา โดยการนำเยื่อผักตบชวามาขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์รูปถาดผลไม้ ซึ่งจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของตัวประสาน (แป้งมันสำปะหลังร่วมกับน้ำ) ที่ทำให้เกิดการหดตัวน้อยที่สุด คือ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเยื่อ อนันต์ เงินประเสริฐ และธรรมรักษ์ ศรีมารุต [4] ศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตต้นแบบภาชนะบรรจุอาหารจากเยื่อเปลือกข้าวโพด นที ฐานมัน [5] พัฒนาภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนโดยปราศจากสารเติมแต่งทางเคมี และเพ็ญภา จันทร์ผ่องและคณะ [6] พัฒนาภาชนะจากเส้นใยปาล์มน้ำมัน ซึ่งพบว่าอัตราส่วนเส้นใยทางใบปาล์มน้ำมันต่อตัวประสานน้ำแป้งมันสำปะหลังที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อแน่น แข็งแรง และขึ้นรูปได้ง่าย คือ อัตราส่วน 1:3 นอกจากนี้การพัฒนาวัสดุ

ที่ย่อยสลายสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์มีการดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ยกตัวอย่าง สาธินี ศิริวัฒน์ และคณะ [7] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายทางชีวภาพของบรรจุภัณฑ์ โดยเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพอลิแลคติกแอซิดและเยื่อชานอ้อยในการทดลอง โดยพบว่า การย่อยสลายของบรรจุภัณฑ์จากวัสดุชนิดนี้ไม่มีผลต่อความเป็นกรดต่างของดิน ปาณิศา แสงนาค และคณะ [8] เตรียมฟิล์มบรรจุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ที่มีสมบัติการป้องกันการผ่านของแสง ความชื้น และออกซิเจน เพื่อยืดอายุของอาหารจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด ยางธรรมชาติ และโคโตนดัดแปรและยศฐา ศรีเทพ และคณะ [9] วิเคราะห์สมบัติของพอลิแลคติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล เป็นวัสดุผสมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยพบว่า เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส วัสดุผสมเกิดการเสียรูปลดลงตามปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เพิ่มขึ้น จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเหล่านี้ ไม่พบการศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารที่ใช้ไบมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุธรรมชาติแต่ละชนิดมีความสามารถและมีสภาวะในการขึ้นรูปที่เหมาะสมแตกต่างกัน เนื่องจากวัสดุธรรมชาติแต่ละสายพันธุ์มีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างภายในที่แตกต่างกัน [10] ดังนั้น เมื่อมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากวัสดุชนิดใหม่ จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาผลกระทบของปัจจัยและหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับวัสดุนั้น ๆ

ในการศึกษาหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมจำเป็นต้องใช้เครื่องมือทางสถิติดังเช่น การออกแบบการทดลอง เนื่องจากการออกแบบการทดลองมีประโยชน์และมีประสิทธิภาพคือ ช่วยให้การดำเนินงานวิจัยมีระเบียบแบบแผนมากขึ้น และช่วยลดจำนวนของการทดลองแต่เพิ่มข้อมูลทางเทคนิคและทางวิทยาศาสตร์ในผลกระทบต่าง ๆ ของปัจจัยการทดลอง [11] ตลอดจนช่วยหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองและรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติ วุฒินันท์ โนนลำดวน และคณะ [12] ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design) และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำแห้งแป้งบุก ชาตรี หอมเขียว และคณะ [13] ประยุกต์ใช้การ

ออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design; BBD) และวิธีพื้นผิวตอบสนอง เพื่อหาพารามิเตอร์การขึ้นรูปอัดร้อนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้อย่างพารา และชัยณรงค์ ศรีวัชรบุตร และคณะ [14] ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) และวิธีพื้นผิวตอบสนอง เพื่อหาสูตรส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เนื่องจากการทดลองที่ไม่ต่อเนื่อง (Non-sequential experiments) และการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการทดลองที่ไม่ต้องการให้มีการตั้งค่าพารามิเตอร์ทุกตัวไว้ที่ระดับต่ำสุดหรือระดับสูงสุด เนื่องจากการทำการทดลองจะได้คำตอบสนองที่ไม่ต้องการหรือเกิดความเสียหายขึ้น [13] อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ทราบผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ในการขึ้นรูปต่อสมบัติทางกลและทางกายของภาชนะบรรจุอาหารจากไบมันสำปะหลังตลอดจนทราบสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการขึ้นรูป ได้แก่ อุณหภูมิขึ้นรูป แรงดันการอัดขึ้นรูป และระยะเวลาการอัดขึ้นรูป ที่มีต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของภาชนะบรรจุอาหารจากไบมันสำปะหลัง และเพื่อหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตภาชนะบรรจุอาหารจากไบมันสำปะหลังบนสมบัติแรงอัดในแนวตั้ง แรงต้านการทิ่มทะลุ และระยะเวลาการดูดซึมน้ำ ซึ่งข้อมูลใหม่ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อนักวิจัย นักพัฒนา และผู้ผลิตภาชนะบรรจุอาหารจากวัสดุธรรมชาติที่สนใจ

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและการเตรียมวัตถุดิบ

วัสดุที่นำมาใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย 1) ไบมันสำปะหลังพันธุ์ห่านาที่ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลัก ได้รับมาจากไร่มันสำปะหลังในจังหวัดสงขลา 2) ชี้อย่อยไม้อย่างพารา ได้รับมาจากโรงงานแปรรูปเฟอร์นิเจอร์ไม้อย่างพาราในจังหวัดสงขลา ใช้เป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป และ 3) แป้งมันสำปะหลังชนิดพิเศษ ตราแมวแดงดาวเทียมลูกโลก จัดซื้อจาก

ห้างหุ้นส่วนจำกัด เกรียงไกรค้าแบ่ง ใช้เป็นส่วนผสมในการทำหน้าที่เป็นตัวประสาน

2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน การวิเคราะห์ผลทางสถิติ และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) เพื่อหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตภาชนะบรรจุอาหารจากไบมันสำปะหลัง ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Design-Expert software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) ในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีนี้จะแสดงความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างตัวแปรต้น (ปัจจัยการทดลอง) และค่าผลตอบสนองหรือตัวแปรตาม (ผลการทดลอง) ซึ่งจะนำไปสู่การค้นพบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ดังนั้นปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยอุณหภูมิขึ้นรูป (x_1) แรงดันการอัดขึ้นรูป (x_2) และระยะเวลาการอัดขึ้นรูป (x_3) โดยมีสมมุติฐานที่ว่า ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเหล่านี้มีผลกระทบต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ ซึ่งระดับพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 โดยขอบเขตของระดับพารามิเตอร์การทดลองเหล่านี้ได้มาจากการทดลองเบื้องต้น ที่มีการทดลองหาอุณหภูมิและระยะเวลาที่สามารถขึ้นรูปวัสดุชนิดนี้ได้ ซึ่งจากการทดลอง หากใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่ไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวนี้ จะไม่สามารถขึ้นรูปภาชนะได้ และจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต โดยทบทวนหาแรงดันการอัดขึ้นรูปที่มักใช้ขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัด ดังนั้นจากการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนได้สภาวะที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 17 สภาวะ ซึ่งประกอบด้วย 12 สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน และการทดลองที่จุดศูนย์กลาง จำนวน 5 การทดลองซ้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับพารามิเตอร์ในการออกแบบการทดลอง

Factors	ID	Parameter levels		
		Low (–)	Medium (0)	High (+)
Temperature (°C)	x_1	170	180	190
Compression pressure (psi)	x_2	1500	2000	2500
Pressing time (Min.)	x_3	5	7	9

2.3 การผลิตชิ้นงานตัวอย่างของภาชนะบรรจุอาหารจากไบมันสำปะหลัง

การผลิตภาชนะบรรจุอาหารจากไบมันสำปะหลังมีขั้นตอนการผลิต 3 ขั้นตอนหลัก คือ 1) การเตรียมวัตถุดิบ เริ่มจากการนำไบมันสำปะหลังไปตากแห้งเพื่อไล่ความชื้นออก จากนั้นนำไบมันสำปะหลังที่แห้งแล้วมาคัดเลือกก้อนขนาดใหญ่ออกก่อนจะนำเข้าเครื่องบดหยาบ เมื่อไบมันสำปะหลังผ่านการบดหยาบแล้ว นำวัสดุร่อนคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงขนาด 12 เมช เพื่อให้ขนาดของไบมันมีขนาดใกล้เคียงกัน ขณะเดียวกันนำซีลี้อยไม้ยางพาราไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นในเนื้อไม้ จากนั้นนำเข้ากระบวนการร่อนคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงขนาด 12 เมช [15] 2) การเตรียมตัวประสาน นำแป้งมันสำปะหลังปริมาณ 125 กรัม ผสมกับน้ำเปล่าปริมาณ 500 มิลลิลิตร จากนั้นให้ความร้อนด้วยไฟอ่อน ๆ จนสีแบ่งเปียกใส แล้วนำไปพักไว้ให้เย็นตัวก่อนนำไปผสมกับวัตถุดิบ และ 3) การขึ้นรูป นำไบมันสำปะหลังที่บดแล้วมาผสมกับซีลี้อยไม้ที่อัตราส่วน 75 กรัม ต่อ 25 กรัม จากนั้นนำมาผสมกับตัวประสานปริมาณ 50 มิลลิลิตร โดยการคลุกเคล้าและบีบนิ้วให้ทุกส่วนผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันหมด หลังจากนั้น นำวัสดุที่เตรียมไว้ซึ่งน้ำหนักปริมาณ 65 กรัม และนำไปใส่ในแม่พิมพ์รูปทรงภาชนะบรรจุอาหารที่มีขนาดกว้าง 110 มิลลิเมตร ยาว 110 มิลลิเมตร สูง 36 มิลลิเมตร ซึ่งในการขึ้นรูปจะดำเนินการอัดขึ้นรูปตามสภาวะที่ได้ออกแบบการทดลองในตารางที่ 2 เสร็จจากนั้นนำชิ้นงานภาชนะบรรจุอาหารออกจากแม่พิมพ์และตัดขอบที่เป็นส่วนเกิน

2.4 การทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพ

2.4.1 การทดสอบการอัดในแนวตั้ง เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานแรงอัดในแนวตั้งของภาชนะบรรจุอาหารจากไบมันสำปะหลัง ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 3035 ซึ่งใช้สำหรับการทดสอบการรับแรงกดอัดของกระดาดลูกฟูก ในการทดสอบดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางกลเนกประสงค์รุ่น NRI-TS500-50 จากบริษัท นรินท์ อินสทรูเมนต์ จำกัด และกดอัดในแนวตั้งของภาชนะบรรจุอาหารด้วยความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 1(a)

2.4.2 การทดสอบการทิ่มทะลุ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานแรงทิ่มทะลุของภาชนะบรรจุอาหารจากไขมันสำหรับ ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการทดสอบจากมาตรฐาน ISO 3036 ซึ่งใช้สำหรับทดสอบการต้านทานแรงทิ่มทะลุของกระดาษลูกฟูก ในการทดสอบดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นกระดาษเช่นเดียวกัน โดยการกดทิ่มให้ทะลุภาชนะบรรจุอาหารด้วยความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 1(b)

2.4.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ เป็นการทดสอบเพื่อหาระยะเวลาการดูดซึมน้ำของภาชนะบรรจุอาหาร ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 321-2560 ซึ่งใช้สำหรับทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของกระดาษลูกฟูก ในการทดสอบนำสี่เหลี่ยมอาหารสีแดงผสมกับน้ำเปล่า จากนั้นนำไซริงค์ดูดของเหลว 5 มิลลิลิตร และหยดลงตรงกลางของบรรจุภัณฑ์ (กันบรรจุภัณฑ์) จำนวน 5 หยด และเริ่มจับเวลาในทันที หลังจากนั้นรอจนกว่าของเหลวทั้ง 5 หยดซึมเข้าบรรจุภัณฑ์จนหมดแล้วจึงบันทึกระยะเวลาการดูดซึมน้ำดังแสดงในรูปที่ 1(c)

ตารางที่ 2 สภาวะการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน และผลการทดลอง

Run No.	Variable factor			Response		
	Temperature	Pressure	Time	VCF (N)	PF (N)	WA (min)
*1	180	2000	7	37.08	0.69	21.08
*2	180	2000	7	35.82	0.59	20.32
3	170	2000	9	31.61	0.90	18.77
4	190	2000	5	28.33	0.63	22.40
*5	180	2000	7	34.43	0.65	21.31
6	180	1500	5	10.88	1.60	31.45
7	170	1500	7	15.33	1.67	21.85
8	180	1500	9	7.44	1.49	22.45
*9	180	2000	7	36.37	0.63	20.42
10	190	2000	9	25.44	0.66	26.03
11	180	2500	9	27.08	0.89	22.34
*12	180	2000	7	36.46	0.63	20.80
13	190	2500	7	31.03	0.60	13.63
14	170	2000	5	36.96	0.74	16.14
15	180	2500	5	30.59	0.59	5.84
16	190	1500	7	16.82	1.15	32.59
17	170	2500	7	38.14	0.67	15.77

หมายเหตุ: *การทดลองซ้ำ; VCF คือ Vertical Compressive Force (แรงอัดในแนวตั้ง); PF คือ Puncture Force (แรงต้านการทิ่มทะลุ); WA คือ Water Absorption (การดูดซึมน้ำ)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละรูปแบบจำลองการถดถอย ปัจจัย อันตรกิริยา และความสมรูป (Lack of fit) ในสมบัติแรงอัดในแนวตั้ง แรงต้านการทิ่มทะลุ และระยะเวลาการดูดซึมน้ำ แสดงในตารางที่ 3 จากการวิเคราะห์พบว่าแรงอัดในแนวตั้ง และแรงต้านการทิ่มทะลุ มีรูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม คือ รูปแบบเชิงเส้นโค้ง (Quadratic model) แต่ระยะเวลาการดูดซึมน้ำมีรูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม คือ รูปแบบที่มี 2 ปัจจัยร่วมกัน (Two-factor interaction model; 2FI) ซึ่งรูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมเหล่านี้มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของแต่ละปัจจัยในรูปแบบจำลองการถดถอยพบว่า อุณหภูมิขึ้นรูป (x_1) แรงดันการอัดขึ้นรูป (x_2) และระยะเวลาการอัดขึ้นรูป (x_3) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อแรงอัดในแนวตั้ง แรงต้านการทิ่มทะลุ และระยะเวลาการดูดซึมน้ำ ($p < 0.05$) และเมื่อวิเคราะห์การเกิดอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต่าง ๆ พบว่า การอันตรกิริยาระหว่างแรงอัดในแนวตั้งและระยะเวลาการดูดซึมน้ำไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ซึ่งหมายความว่า การเกิดอันตรกิริยามีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ ทำให้ต้องมีการลดรูปของรูปแบบจำลองการถดถอย และวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละรูปแบบจำลองอีกครั้ง ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4 นอกจากนี้ รูปแบบที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า p -value ของความสมรูปที่ไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ซึ่งหมายความว่า รูปแบบจำลองการถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูลการทดลอง

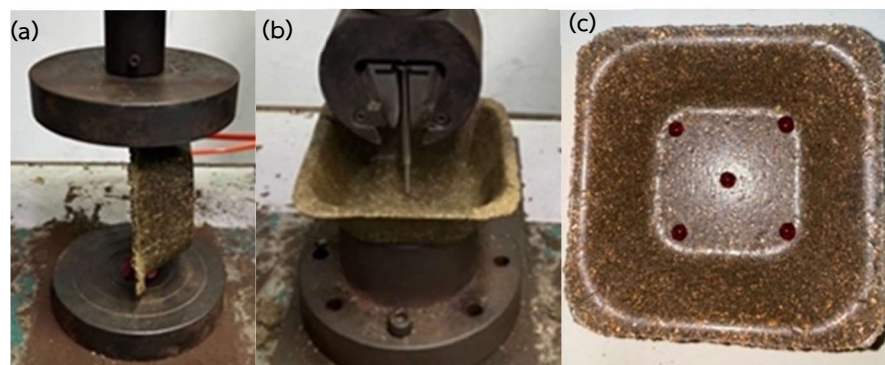
ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่า ($Adj-R^2$) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ทำนาย ($Pred-R^2$) ดังแสดงในตารางที่ 4 ใช้เพื่อวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมเช่นกัน จากข้อมูลพบว่าค่า R^2 ของทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าอยู่ในช่วง 98.85% ถึง 99.24% นั้นหมายความว่า ความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่สามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบจำลองการถดถอยเพียง 0.76% ถึง 1.15% และค่า $Adj-R^2$ ของแต่ละรูปแบบจำลองมีค่าที่สูงใกล้เคียงกับค่า R^2 ซึ่งเป็นการยืนยันว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้

เป็นรูปแบบที่เหมาะสม และเมื่อวิเคราะห์ $Pred-R^2$ พบว่า สมบัติระยะเวลาการดูดซึมน้ำแสดงค่าสูงที่สุด คือ 97.51% นั้นหมายความว่า รูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้นี้สามารถประมาณการหรืออธิบายความผันแปรในข้อมูลใหม่ได้ 97.51% จากข้อมูล R^2 , $Adj-R^2$ และ $Pred-R^2$ ของแต่ละรูปแบบมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นการยืนยันว่า รูปแบบการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม [13, 16-17] ดังนั้น สมการถดถอยที่เหมาะสมกับค่าการทดลองของแรงอัดในแนวตั้ง (VCF) แรงต้านการซึมทะลุ (PF) และระยะเวลาการดูดซึมน้ำ (WA) แสดงดังสมการที่ (1) - (3)

$$VCF = -353.98 + 0.60475 x_1 + 0.27444 x_2 + 19.58 x_3 - 0.00043 x_1 x_2 - 0.000044 x_2^2 - 1.46661 x_3^2 \quad (1)$$

$$PF = 21.35 - 0.05675 x_1 - 0.0119 x_2 - 0.55427 x_3 + 0.000023 x_1 x_2 + 0.000103 x_2 x_3 + 0.00000158 x_2^2 + 0.02664 x_3^2 \quad (2)$$

$$WA = -152.22 + 1.5645 x_1 + 0.0586 x_2 - 11.89 x_3 - 0.00064 x_1 x_2 + 0.006375 x_2 x_3 \quad (3)$$



รูปที่ 1 การทดสอบ (a) การอัดในแนวตั้ง (b) การซึมทะลุ และ (c) การดูดซึมน้ำ

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับรูปแบบจำลองการถดถอยต่าง ๆ ก่อนการลดรูปในแต่ละสมบัติ

Source	VCF		PF		WA	
	F-value	p-value	F-value	p-value	F-value	p-value
Model	77.19	< 0.0001*	132.84	< 0.0001*	231.50	< 0.0001*
x_1	23.65	0.0018*	59.80	0.0001*	139.00	< 0.0001*
x_2	330.79	< 0.0001*	675.75	< 0.0001*	731.96	< 0.0001*
x_3	13.09	0.0085*	9.77	0.0167*	53.79	< 0.0001*
$x_1 x_2$	8.39	0.0231*	27.41	0.0012*	94.26	< 0.0001*
$x_1 x_3$	0.6864	0.4347	2.29	0.1742	0.5682	0.4684
$x_2 x_3$	0.0006	0.9818	22.75	0.0020*	369.45	< 0.0001*
x_1^2	0.3745	0.5599	0.3706	0.5619	-	-
x_2^2	237.29	< 0.0001*	359.72	< 0.0001*	-	-
x_3^2	66.27	< 0.0001*	26.22	0.0014*	-	-
Lack of Fit	3.80	0.1149	1.93	0.2662	3.45	0.1254
R^2 (%)	99.00		99.42		99.29	
Adj- R^2 (%)	97.72		98.67		98.86	
Pred- R^2 (%)	87.78		94.12		96.79	

หมายเหตุ: * ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับรูปแบบจำลองการถดถอยต่าง ๆ หลังการลดรูปในแต่ละสมบัติ

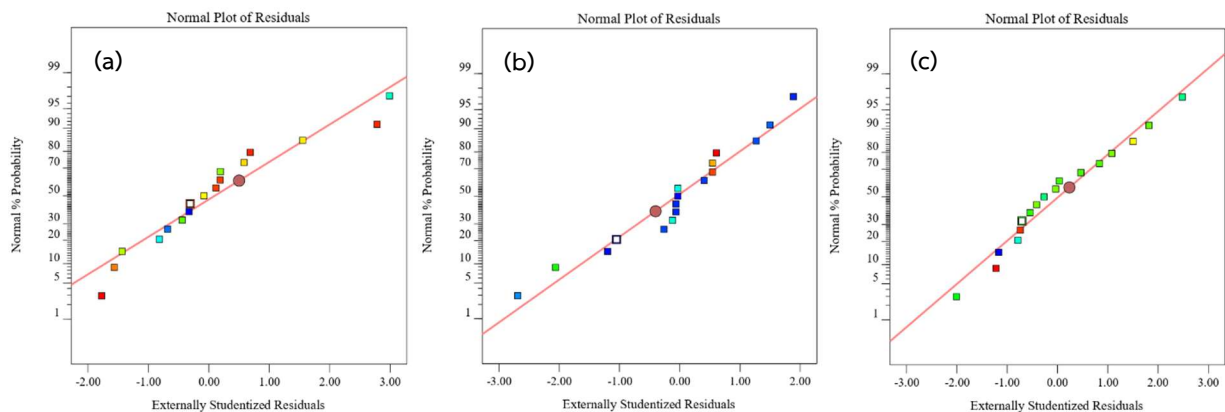
Source	VCF		PF		WA	
	F-value	p-value	F-value	p-value	F-value	p-value
Model	143.41	< 0.0001*	158.81	< 0.0001*	289.04	< 0.0001*
x_1	29.34	0.0003*	55.72	< 0.0001*	144.68	< 0.0001*
x_2	410.33	< 0.0001*	629.72	< 0.0001*	761.87	< 0.0001*
x_3	16.23	0.0024*	9.11	0.0145*	55.99	< 0.0001*
x_1x_2	10.41	0.0091*	25.54	0.0007*	98.11	< 0.0001*
x_1x_3	-	-	-	-	-	-
x_2x_3	-	-	21.20	0.0013*	384.55	< 0.0001*
x_2^2	293.93	< 0.0001*	335.01	< 0.0001*		
x_3^2	81.78	< 0.0001*	24.20	0.0008*		
Lack of Fit	2.29	0.2212	1.90	0.2764	3.16	0.1416
R^2 (%)	98.85		99.20		99.24	
Adj- R^2 (%)	98.16		98.57		98.90	
Pred- R^2 (%)	94.27		96.54		97.51	

หมายเหตุ: * ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

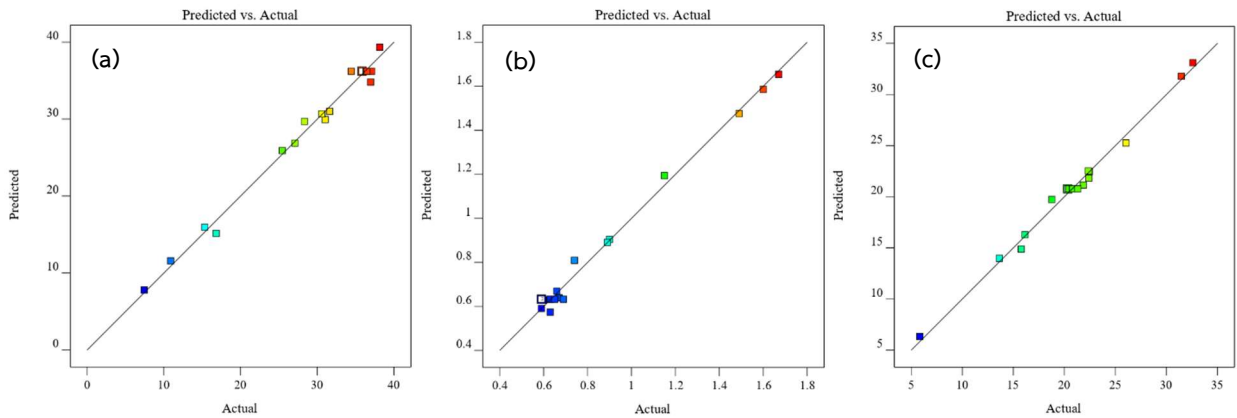
3.2 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง

ก่อนการยอมรับรูปแบบการถดถอยที่เหมาะสม การวิเคราะห์ความพอเพียงของรูปแบบจำลองโดยกราฟความน่าจะเป็นปกติ (Normal probability) และกราฟค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง (Predicted vs. actual values) เป็นสิ่งจำเป็น รูปที่ 2 แสดงกราฟความน่าจะเป็นปกติของแรงอัดในแนวตั้ง แรงต้านการทิ่มทะลุ และระยะเวลาการดูดซึมน้ำ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า กราฟทั้ง 3 มีค่าเศษเหลือ (Residuals) แนบชิดกับเส้นตรง และไม่มีค่าผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ดังนั้นสามารถ

สรุปได้ว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ [13, 18-19] ขณะเดียวกัน รูปที่ 3 แสดงกราฟค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการทดลองจริง และการทำนายโดยรูปแบบจำลองการถดถอย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างเป็นเส้นตรง จึงเป็นการยืนยันว่า รูปแบบจำลองการถดถอยเหล่านี้สามารถทำนายค่าจากการทดลองได้อย่างแม่นยำ ดังนั้น จากการวิเคราะห์กราฟทั้ง 2 สามารถสรุปได้ว่า รูปแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและมีความพอเพียง



รูปที่ 2 กราฟความน่าจะเป็นปกติของ (a) แรงอัดในแนวตั้ง (b) แรงต้านการทิ่มทะลุ และ (c) ระยะเวลาการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 3 กราฟค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริงของ (a) แรงอัดในแนวตั้ง (b) แรงต้านการทิ่มทะลุ และ (c) ระยะเวลาการดูดซึมน้ำ

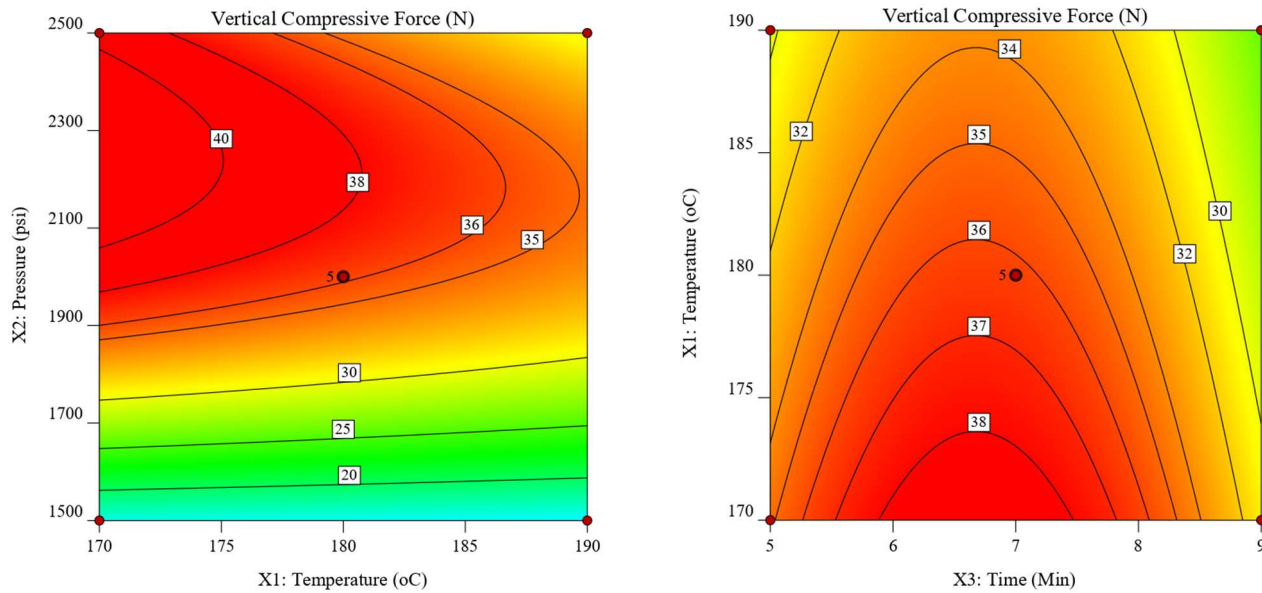
3.3 ผลกระทบปัจจัยการขึ้นรูปต่อแรงอัดในแนวตั้ง

จากสมการถดถอยของแรงอัดในแนวตั้ง (VCF) สามารถนำมาสร้างกราฟโครงร่าง (Contour plot) แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ในช่วงแรงดันการอัดขึ้นรูป 1500-1850 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การเพิ่มอุณหภูมิขึ้นรูปส่งผลให้ความสามารถต้านทานแรงอัดในแนวตั้งของภาชนะบรรจุอาหารจากไบมันส์สำหรับหลังลดลงอย่างช้า ๆ และในช่วงแรงดันการอัดขึ้นรูป 1500-1850 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การเพิ่มอุณหภูมิขึ้นรูปส่งผลให้ความสามารถต้านทานแรงอัดในแนวตั้งลดลงอย่างรวดเร็ว สิ่งนี้เกิดจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนของไบมันส์สำหรับหลังและซีลรอยไม่ยางพารา [19-20] รวมไปถึงแป้งมันส์สำหรับที่เป็นตัวประสานของภาชนะบรรจุอาหาร ส่งผลให้วัสดุต่าง ๆ มีความแข็งแรงลดลง และประสิทธิภาพการทำหน้าที่เป็นตัวประสานต่ำลง ขณะเดียวกัน การอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันที่สูงขึ้นในช่วง 1500-2200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ส่งผลให้ความสามารถต้านทานแรงอัดในแนวตั้งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่เมื่อแรงดันเกิน 2200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ส่งผลให้ความสามารถต้านทานแรงอัดในแนวตั้งของภาชนะบรรจุอาหารลดลง นอกจากนี้ พบด้วยว่า การเพิ่มระยะเวลาการอัดขึ้นรูปในช่วง 5-6.5 นาที ทำให้ความสามารถต้านทานแรงอัดในแนวตั้งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่เมื่อระยะเวลาการอัดขึ้นรูปเกิน 6.5 นาที มีผลให้ความสามารถต้านทานแรงอัดในแนวตั้งของภาชนะบรรจุอาหารลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในความเป็นจริง ระยะเวลาการอัดขึ้นรูปมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิขึ้นรูป เมื่อขึ้นรูปวัสดุธรรมชาติด้วยระยะเวลาที่นานเกินไป จะทำให้วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมเริ่มเสื่อมสภาพตามระยะเวลาการอัด

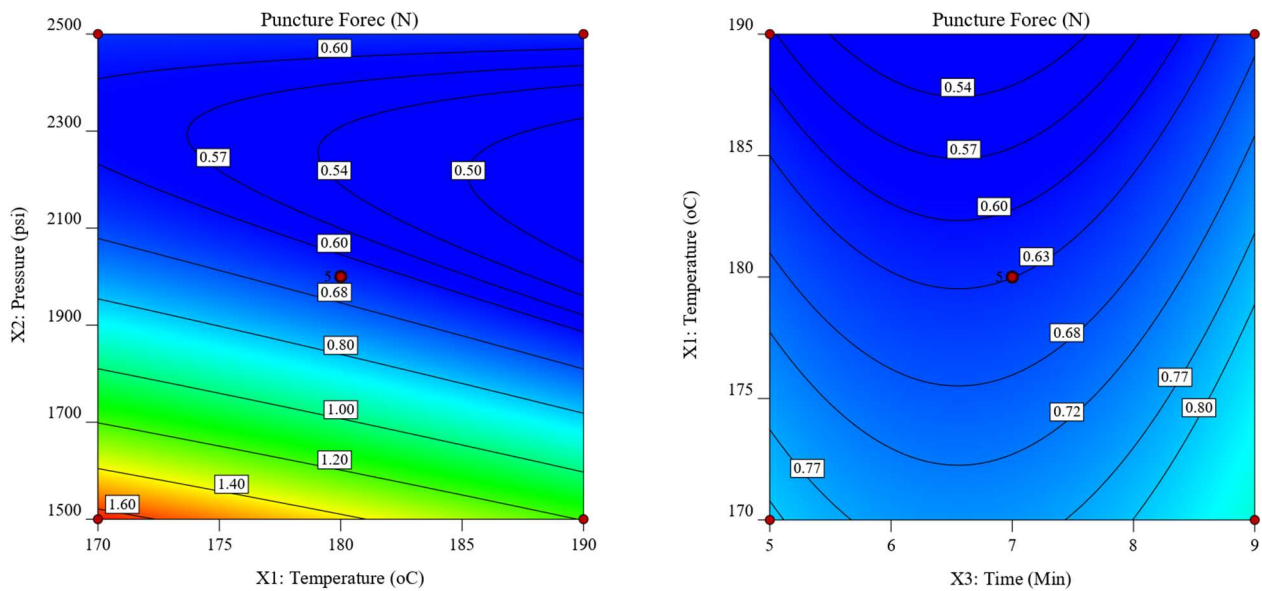
ขึ้นรูปที่นานขึ้น [13] ถึงแม้จะใช้อุณหภูมิขึ้นรูปเท่าเดิม แต่ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในวัสดุจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอัดขึ้นรูปที่นานขึ้น ทำให้ความสามารถในการรับแรงของวัสดุลดลง

3.4 ผลกระทบปัจจัยการขึ้นรูปต่อแรงต้านการทิ่มทะลุ

เมื่อนำสมการถดถอยของแรงต้านการทิ่มทะลุ (PF) มาสร้างกราฟโครงร่างดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิขึ้นรูป ส่งผลให้แรงต้านการทิ่มทะลุของภาชนะบรรจุอาหารจากไบมันส์สำหรับหลังลดลงอย่างชัดเจน ดังที่กล่าวข้างต้นเกิดจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนของไบมันส์สำหรับหลังและซีลรอยไม่ยางพารา ปกติการเสื่อมสภาพของเส้นใยธรรมชาติจะเกิดขึ้นในช่วง 257–382 °C ซึ่งเป็นการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน [21] ขณะเดียวกัน การอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันที่สูงขึ้นในช่วง 1500-2300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีผลให้แรงต้านการทิ่มทะลุลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อแรงดันเกิน 2300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำให้แรงต้านการทิ่มทะลุเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อวัสดุมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โครงสร้างภายในของวัสดุมีการยึดเกาะที่แน่นหนาและช่องว่างภายในหรือรูพรุนมีขนาดที่เล็กลงหรือลดลง ทำให้การถ่ายทอดแรงระหว่างอนุภาคและกับตัวประสานมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้น ความสามารถในการต้านทานแรงที่กระทำจึงมีมากขึ้น [13] นอกจากนี้ พบด้วยว่า การเพิ่มระยะเวลาการอัดขึ้นรูปในช่วง 5-6.5 นาที ทำให้แรงต้านการทิ่มทะลุลดลง แต่เมื่อระยะเวลาการอัดขึ้นรูปเกิน 6.5 นาที กลับทำให้แรงต้านการทิ่มทะลุเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเสื่อมสภาพของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสม



รูปที่ 4 กราฟโครงร่างแสดงผลกระทบอุณหภูมิการขึ้นรูป แรงดันการอัดขึ้นรูป และระยะเวลาการอัดขึ้นรูปต่อแรงอัดในแนวตั้ง



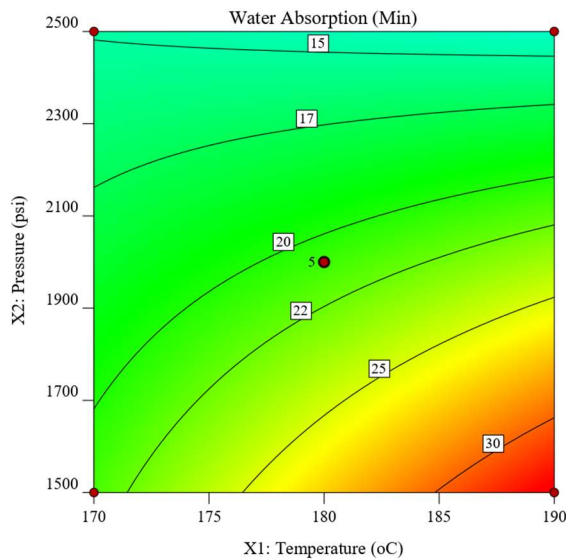
รูปที่ 5 กราฟโครงร่างแสดงผลกระทบอุณหภูมิการขึ้นรูป แรงดันการอัดขึ้นรูป และระยะเวลาการอัดขึ้นรูปต่อแรงต้านการทิ่มทะลุ

3.5 ผลกระทบปัจจัยการขึ้นรูปต่อระยะเวลาการดูดซึมน้ำ

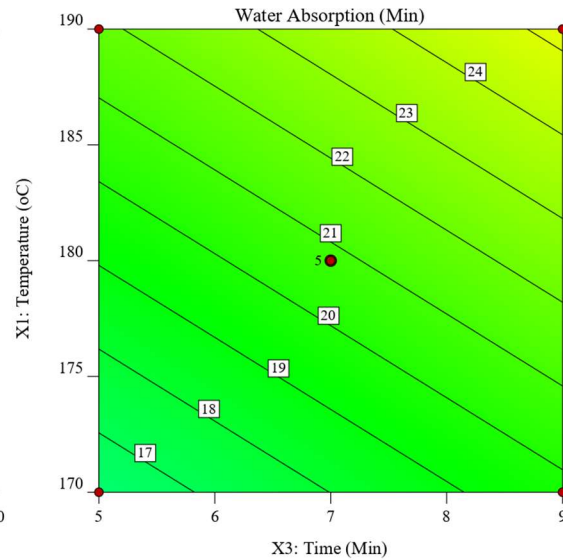
รูปที่ 6 แสดงกราฟโครงร่างที่สร้างมาจากสมการถดถอยของระยะเวลาการดูดซึมน้ำ โดยชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิขึ้นรูปในช่วง 170-190 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ระยะเวลาการดูดซึมน้ำของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า การเสื่อมสภาพของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้วัสดุธรรมชาติมีความสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำมากขึ้น ขณะเดียวกัน การอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันที่สูงขึ้นในช่วง 1500-2500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำให้ระยะเวลาการ

ดูดซึมน้ำลดลงอย่างชัดเจน ปกติความสามารถการดูดซึมน้ำของวัสดุจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น เมื่อวัสดุมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โครงสร้างภายในของวัสดุจะมีการประสานที่แน่นหนาเพิ่มขึ้น ทำให้การแทรกซึมของน้ำเข้าสู่โครงสร้างเป็นไปได้ยากขึ้น ตลอดจนที่อยู่อาศัยของน้ำลดลงเช่นกัน ทำให้วัสดุดูดซึมน้ำลดลงตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น [13] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากภาชนะบรรจุอาหารมีตัวประสานเคลือบบริเวณผิวหน้า ทำให้ปัจจัยความหนาแน่นมีผลต่อพฤติกรรมดูดซึมน้ำลดลง ดังนั้น การอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันที่สูงขึ้นแล้วทำให้

ระยะเวลาการดูดซึมน้ำลดลง เกิดจากการใช้แรงดันอัดที่สูงขึ้น ส่งผลให้เป็นการทำลายผิวเคลือบบริเวณผิวหน้ามากขึ้น มีผลให้การแทรกซึมของน้ำเข้าสู่โครงสร้างเป็นไปได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น นอกจากนี้ พบด้วยว่า การเพิ่มระยะเวลาการอัดขึ้นรูปในช่วง 5-9 นาที มีผลให้ระยะเวลาการดูดซึมน้ำมากขึ้น



ในช่วง 17-24 นาที เนื่องจากการเคลือบผิวหน้าของวัสดุประสานมีความสมบูรณ์มากขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาการอัดขึ้นรูป ทำให้การแทรกซึมของน้ำเข้าสู่โครงสร้างของภาชนะบรรจุอาหารจากไขมันสำปะหลังเป็นไปได้อย่างยากขึ้น ทำให้ระยะเวลาการดูดซึมน้ำนานขึ้น



รูปที่ 6 กราฟโครงร่างแสดงผลกระทบอุณหภูมิการขึ้นรูป แรงดันการอัดขึ้นรูป และระยะเวลาการอัดขึ้นรูปต่อระยะเวลาการดูดซึมน้ำ

3.6 สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด และการยืนยันผล

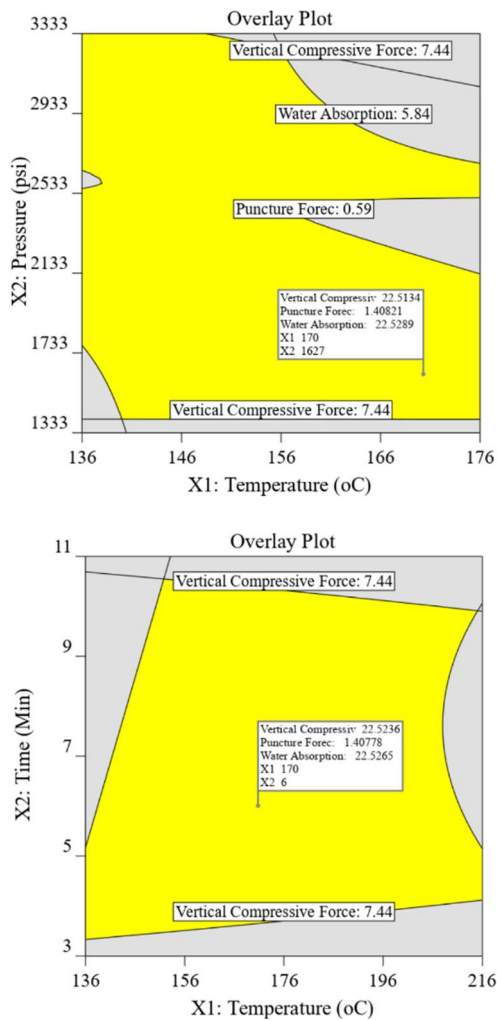
สภาวะการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไขมันสำปะหลังที่เหมาะสมที่สุดร่วมกันของทั้ง 3 สมบัติ สามารถหาได้โดยใช้เทคนิคการซ้อนทับกัน (Overlay plot) ของกราฟเส้นโครงร่างผลตอบสนองแต่ละตัว [13-14, 19] ซึ่งกำหนดเงื่อนไขให้แรงอัดในแนวตั้ง แรงต้านการทิ่มทะลุ และระยะเวลาการดูดซึมน้ำมีค่าสูงที่สุด จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert software พบว่า สภาวะการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไขมันสำปะหลังที่เหมาะสมที่สุดต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพคือ การขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส แรงดันการอัดขึ้นรูป 1600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และระยะเวลาการอัดขึ้นรูป 6 นาที ซึ่งมีค่าความพึงพอใจ (Desirability score) 0.615 ดังแสดงในรูปที่ 7 นอกจากนี้ เพื่อยืนยันความถูกต้องของสภาวะการขึ้นรูปและค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย ไขมันสำปะหลังและส่วนผสมต่าง ๆ ถูกขึ้นรูปโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมนี้ และทดสอบแรงอัดในแนวตั้ง แรงต้านการทิ่มทะลุ และระยะเวลาการดูดซึมน้ำ ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5 โดย

พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีความแตกต่างสูงสุดจากค่าที่ได้จากการทำนาย 4.11% เกิดขึ้นในสมบัติแรงอัดในแนวตั้ง ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมากไม่เกิน 5% ขณะเดียวกัน ภาชนะบรรจุอาหารจากไขมันสำปะหลังต้นแบบ ที่ผลิตจากสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังรูปที่ 8

4. สรุปผล

การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนและวิธีพื้นผิวตอบสนองได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบปัจจัยในการขึ้นรูปและหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดของภาชนะบรรจุอาหารจากไขมันสำปะหลัง จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า อุณหภูมิขึ้นรูป แรงดันการอัดขึ้นรูป และระยะเวลาการอัดขึ้นรูปมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อแรงอัดในแนวตั้ง แรงต้านการทิ่มทะลุ และระยะเวลาการดูดซึมน้ำ เช่นเดียวกันพบด้วยว่า การเพิ่มอุณหภูมิขึ้นรูปส่งผลให้ความสามารถต้านทานแรงอัดในแนวตั้งและแรงต้านการทิ่มทะลุของภาชนะบรรจุอาหารจากไขมันสำปะหลังลดลงอย่างช้า ๆ อย่างไรก็ตาม การอัดขึ้นรูป

ด้วยแรงดันที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถต้านทานแรงอัดในแนวตั้งเพิ่มขึ้น แต่ทำให้แรงต้านการทิ่มทะลุลดลง และการเพิ่มระยะเวลาการอัดขึ้นรูป มีผลให้ระยะเวลาการดูดซึมน้ำนานขึ้น นอกจากนี้ ในการใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงร่างผลตอบแทนแต่ละตัวพบว่า สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโมันสำปะหลังคือ การขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส แรงดันการอัดขึ้นรูป 1600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และระยะเวลาการอัดขึ้นรูป 6 นาที ขณะเดียวกันพบด้วยว่า ภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดนี้ มีค่าการทดลองจริงแตกต่างสูงสุดจากค่าที่ได้จากการทำนายน้อยกว่า 5% อย่างไรก็ตาม ภาชนะบรรจุอาหารจากไบโมันสำปะหลังนี้ยังไม่เหมาะต่อการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับอาหารโดยตรง



รูปที่ 7 โครงร่างพื้นผิวผลตอบแทนวางซ้อนทับกันของสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ

ตารางที่ 5 สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดร่วมกันของทุกสมบัติ และผลตอบแทนจากการทำนายและการทดสอบจริง

	Variable factor			Response		
	Temperature	Pressure	Time	VCF	PF	WA
Predicted	170	1600	6	22.5	1.41	22.5
Observed	(°C)	(psi)	(min.)	21.6	1.67	22.2
Standard deviation				(0.21)	(0.15)	(0.18)

หมายเหตุ: ค่าผลตอบแทนที่ได้จากการทดลองจริงเพื่อยืนยันความถูกต้องได้มาจากการทดสอบซ้ำ 5 ครั้งตัวอย่าง ซึ่งให้ค่าเป็นเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ย



รูปที่ 8 ภาชนะบรรจุอาหารจากไบโมันสำปะหลังต้นแบบที่ผลิตจากสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (กสว.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปีงบประมาณ 2566 ภายใต้ชุดโครงการ “การวิจัยและพัฒนานวัตกรรมพร้อมใช้สู่การยกระดับศักยภาพและความเข้มแข็งสำหรับผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง ตำบลท่าข้าม อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสงขลา ด้วยการจัดการชุมชนและสร้างการเรียนรู้วัฒนธรรมจากทรัพยากรพื้นถิ่น”

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. เนื้อที่เพาะปลูกมันสำปะหลังเนื้อที่เก็บเกี่ยวผลผลิต. เข้าถึงได้จาก : <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/file> [เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม 2565]
- [2] นพดล จันทรลักษณ์, สมนึก วิฒนศรีกุล. การออกแบบและสร้างเครื่องขึ้นรูปภาชนะที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติ. การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. โรงแรมเมธาวลัย ชะอำ จังหวัดเพชรบุรี: 2555. หน้า 1770-1775.

- [3] ปาริชาติ ธาราพัตราพร, วงศ์ผกา วงศ์รัตน์. *การศึกษาบรรจุภัณฑ์จากผักตบชวา*. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร อ า ห า ร ค ณ ะ วิ ศ ว ก ร ร ม ศ า ส ต ร์ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน; 2542.
- [4] อนันต์ เงินประเสริฐ, ธรรมรักษ์ ศรีมารุต. *การศึกษาคือความเป็นไปได้ของการผลิตต้นแบบภาชนะบรรจุอาหารจากเยื่อเปลือกข้าวโพด*. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน; 2542.
- [5] นที ฐานัน. *การพัฒนาภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลัง*. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2557.
- [6] เพ็ญภา จันทร์ผ่อง, อมรทิพย์ เพ็ญสมบุรณ์, จิระวัฒน์ อินทสุริช, จิระวัฒน์ พระหัต. *ภาชนะจากเส้นใยทางใบปาล์มน้ำมัน*. วิทยาลัยอาชีวศึกษาชุมพร; 2563.
- [7] สาธินี ศิริวัฒน์, ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์, ธนาวัลี ลีจากภัย. *การย่อยสลายทางชีวภาพของบรรจุภัณฑ์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดและเยื่อชานอ้อย*. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2553;3(2): 1-8.
- [8] ปาณิศา แสงนาค, ขวยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฐ์, เพชรรุ่งเสนานุช. *ผลของยางธรรมชาติ/ไคโตซานดัดแปรต่อสมบัติการป้องกันการซึมผ่าน สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์พอลิแลคติกแอซิด*. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 2564;29(1): 46-61.
- [9] ยศฐา ศรีเทพ, ญัฐกรณ์ หงษ์คำ, พัชระ ตะโคตร. *การวิเคราะห์การผสมพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาซ. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร*. 2563;14(2): 98-109.*
- [10] ชาตรี หอมเขียว. *การพัฒนาและการประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติเชิงอุตสาหกรรม*. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 2557;10(2): 97-110.
- [11] John RCS. *Experiments with mixtures, ill-conditioning, and ridge regression*. *Journal of Quality Technology*. 1984;16: 81-96.
- [12] วุฒินันท์ โนนลำดวน, ญัฐพล ภูมิสะอาด, ละมุล วิเศษ, ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล. *การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำแห้งแปงบุกด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองและการออกแบบส่วนผสมกลาง*. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2556;6(2): 55-63.
- [13] ชาตรี หอมเขียว, วรพงศ์ บุญช่วยแทน, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, ธเนศ รัตนวิไล. *พารามิเตอร์การผลิตที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพาราโดยใช้การออกแบบบล็อกซ์-เบทั้นเคน*. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 2560;27(2): 315-328.
- [14] ชัยณรงค์ ศรีระบุตร, ชาตรี หอมเขียว, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์. *อัตราส่วนที่เหมาะสมต่อความหนาของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ โดยใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมและพื้นผิวตอบสนอง*. *วิศวกรรมลาดกระบัง*. 2564;38(4): 151-165.
- [15] Homkhiew C, Boonchouytan W, Cheewawuttipong W, Hoysakul N, Kaewkong W, Ratanawilai T. *Measurement in some properties of non-toxic particleboard to optimize the formulation for food containers*. *Measurement*. 2020;156: 107617.
- [16] ชาญณรงค์ สายแก้ว, เสริมศักดิ์ เวียงวิเศษ, อภัยศรี บุญเรือง. *การปรับปรุงสมบัติแบบหล่อทรายในอุตสาหกรรมเหล็กหล่อโดยใช้การทดลองแบบส่วนผสม*. *วารสารวิจัย มข.* 2554;16(2): 169-178.
- [17] Montgomery DC. *Design and Analysis of Experiments*. 7ed., John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [18] ชาตรี หอมเขียว, ธเนศ รัตนวิไล. *ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราหลังการแช่น้ำโดยใช้การออกแบบการทดลอง*. *วารสารวิจัย มข.* 2557;19(6): 780-793.
- [19] ชาตรี หอมเขียว, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, วรพงศ์ บุญช่วยแทน. *สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง*. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 2558;11(2): 40-55.
- [20] Nonaka S, Umemura K, Kawai S. *Characterization of bagasse binderless particleboard manufactured in high- temperature range*. *Journal of Wood Science*. 2013;59: 50-56.

- [21] Homkhiew C, Boonchouytan W, Cheewawuttipong W, Ratanawilai T. Potential utilization of rubberwood flour and sludge waste from natural rubber manufacturing process as reinforcement in plastic composites. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2018;20: 1792-1803.